干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

塔里木河下游生态输水对地下水埋深变化的影响

陈永金[1]， 艾克热木·阿布拉[2]， 张天举[3,4]， 陈亚鹏[3]，
朱成刚[3]， 程 勇[2]， 刘 璐[3,4]， 李肖杨[3,4]， 张齐飞[3,4]

（1. 聊城大学环境与规划学院，山东 聊城 252059；2. 新疆塔里木河流域管理局，新疆 库尔勒 841000；
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
4. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：地下水是维系荒漠河岸植被生存、生长的关键因子，对于退化植被的恢复具有重要的意义。结合塔里木河下游生态输水过程中地下水埋深的实测数据，详尽分析了2000—2020年地下水埋深的时空变化及对生态输水的响应。监测结果显示：在生态输水条件下，塔里木河下游河道两侧地下水埋深大幅抬升。(1) 在纵向上，自上游段的英苏、中游段的喀尔达依，至下游段的依干不及麻，在距河道100 m处，地下水埋深分别由输水前的7.76 m、9.31 m、7.82 m抬升至3.70 m、4.48 m和2.69 m；在距河道300 m处，地下水埋深分别由输水前的8.09 m、9.15 m、8.25 m抬升至4.53 m、5.00 m和3.29 m；在距河道500 m处，地下水埋深分别由输水前的8.21 m、9.45 m、9.08 m抬升至6.61 m、5.46 m和3.82 m。(2) 在垂直于河道方向上，根据地下水井监测数据，生态输水对塔里木河下游的上、中、下3个区段地下水位的影响范围均达到了1050 m，分别抬升了2.69 m、1.38 m、1.59 m。(3) 生态输水前期（2000—2009年），上、中段地下水位抬升迅速，2009年以后，下游段依干不及麻地下水位抬升幅度明显高于英苏（0.88~4.65 m）和喀尔达依（0.53~4.07 m）。并且，70.5%监测井地下水位波动趋于稳定，说明间歇性的生态输水有助于抬高地下水埋深，是地下水补给的主要来源，对于维持地下水较高水位的动态平衡具有一定的促进作用。

关 键 词：生态输水；地下水位；断面；塔里木河
文章编号：

水是影响干旱区生态系统的重要因素[1]，直接制约着水生态系统及相关生态系统的发育和演变趋势[2]。近百年来，随着气候变化和人类活动的加强，导致水资源问题日益突出[3]。塔里木河位于我国西北干旱区，水资源的开发利用直接关系到该区域的经济发展和生态环境建设。然而该区降水稀少、蒸发强烈且季节性降水年内分配不均导致地表径流稀少，甚至河道断流，在人为因素的干扰下加速了这一过程，如1972年大西海子水库的建成，彻底阻断了河水的下泄，造成塔里木河下游321 km河道断流，尾闾湖泊（罗布泊与台特玛湖）相继干涸[4]。因此，造成地下水埋深持续下降，天然植被大面积衰败死亡，进一步导致沙漠化过程加剧，生态系统受损，物种多样性降低，“绿色走廊”濒临衰亡[5-8]。

针对此，于2000年在塔里木河下游实施了生态应急输水工程，截至2020年已向塔里木河下游输水84.45×10^8 m^3。综观前人研究多集中在生态输水对生态环境[9]、物种多样性[1]、湿地面积[10]、生态安全[11]、土地利用/覆被变化[12]等的影响方面，而对地下水埋深相关的研究，虽然前人已做大量工作[13-16]，但长时间序列的综合研究较为少见。本文结合近20 a的地下水监测井的实测数据，从纵向（沿河道方向）和横向（垂直河道方向）2个方面对输水后的地下水埋深

收稿日期：2021-02-07； **修订日期：**2021-04-21
基金项目：科技部科技基础资源调查专项（2019FY100203）
作者简介：陈永金（1968-），男，副教授，主要从事生态系统修复等方面研究. E-mail: chenyongjin@lcu.edu.cn
通讯作者：张天举（1987-），男，博士生，主要从事生态退化机理与修复等方面研究. E-mail: 2382675001@qq.com

变化进行了分析，旨在为确定塔里木河下游生态需水量提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

塔里木河位于天山以南的塔里木盆地，其下游位于塔克拉玛干和库鲁克沙漠两大沙漠之间，属于温带大陆性气候，降水稀少，气候干燥，多风沙天气，年均降水量17.4~42.0 mm，年均蒸发量2500~3000 mm。自20世纪70年代大西海子水库的建成，彻底阻断了塔里木河地表径流，造成主干河道断流，在自然和人为的双重因素影响下，导致塔里木河下游地下水位严重下降。由地下水维系的自然荒漠河岸植被大面积衰败、死亡，林间沙地活化。

1.2　研究方法

结合塔里木河下游生态输水工程，在塔里木河下游大西海子水库以下输水河道设立9个地下水监测断面，分别是阿克墩、亚合甫马汗、英苏、阿布达勒、喀尔达依、吐格买莱、阿拉干、依干不及麻和库尔干等(图1)。其中，每个断面相距约20~45 km不等，并在断面垂直于河道不同距离上布设地下水监测井40眼，同一断面不同井位相距50~100 m不等。但由于设备的落后及环境条件的限制以及其他外部因素(水淹、沙埋、被破坏等)的影响导致部分数据缺失(2010年以前)，随着技术的发展，我们在原有监测设备的基础上更新换代了实时监测水位仪器，对地下水能够进行实时监测，极大的保证了数据的连续性。

鉴于部分断面数据的缺失，为了能够真实反映实施生态输水工程以来地下水埋深的变化情况，根据距塔里木河输水源头(大西海子水库)的远近，我们选择了具有代表性的3个监测断面，即英苏断面、喀尔达依断面、依干不及麻断面，分别代表下游上、中、下3个区段。

2　结果与分析

2.1　沿河道地下水埋深变化

在输水初期(2000年)，可以看出沿河道方向3个断面地下水埋深基本处于同一水平且普遍较低(图2)，即在100 m处时低于7.76 m，300 m处时低于8.09 m，500 m处时低于8.21 m。这可能是由于河道多年断流造成的。随着生态输水的持续进行，地下水埋深出现显著的升高，在距河道100 m处(图2a)，英苏断面最大水埋深由2000年的7.76 m上升到2020年的3.70 m，喀尔达依断面最大水埋深由2000年的9.31 m上升到2020年的4.49 m，依干不及麻断

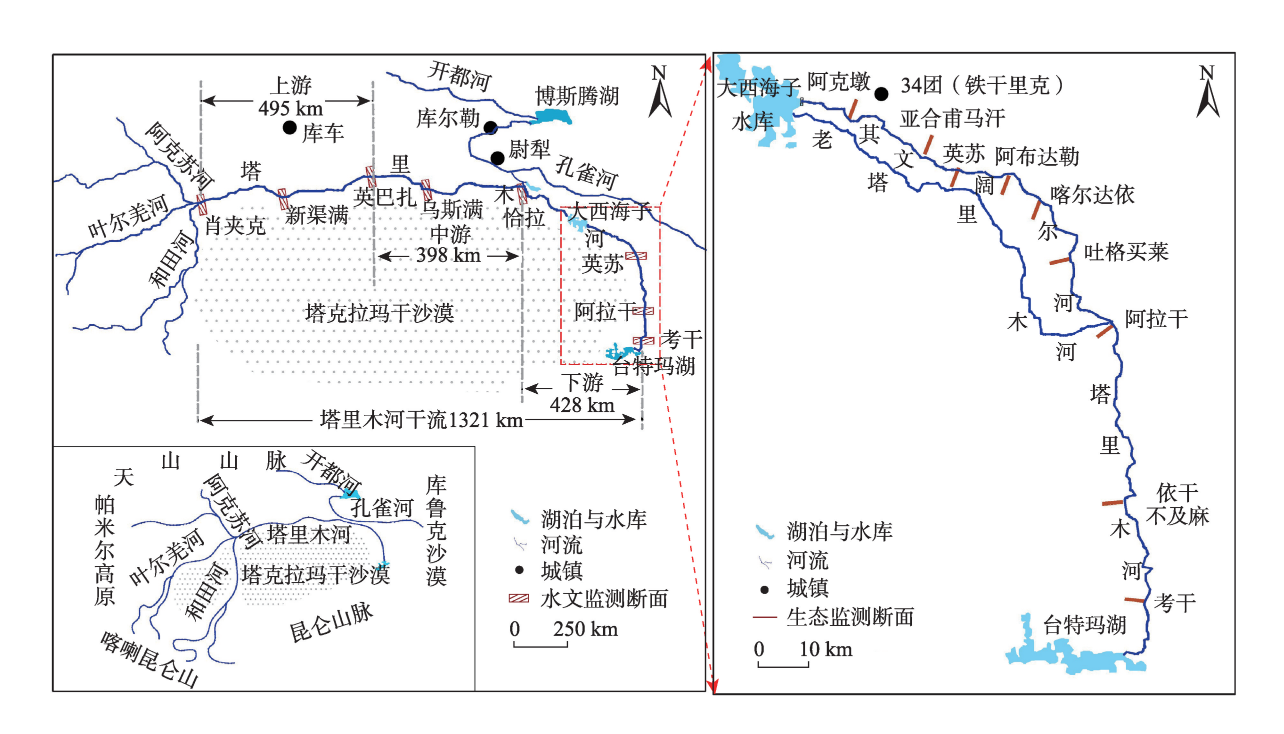


图1　研究区示意图

Fig. 1　Sketch map of the study area

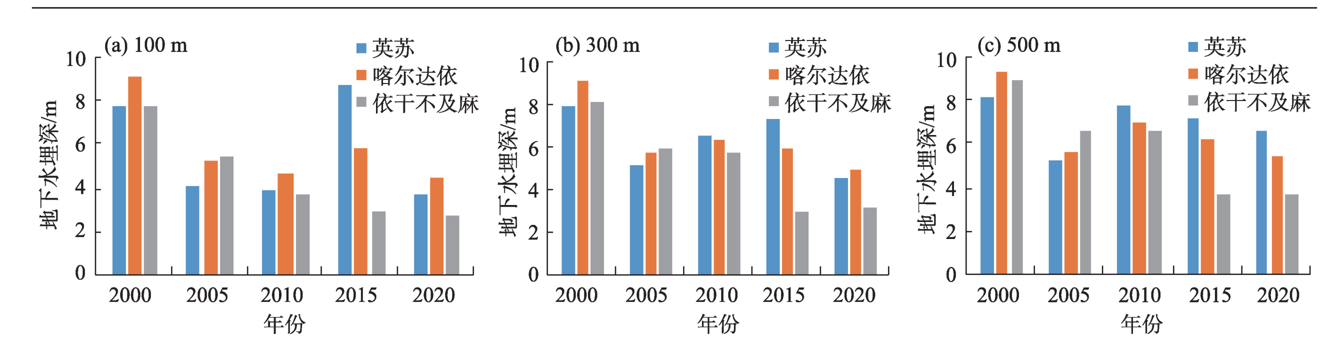


图2　沿河道方向地下水埋深变化

Fig. 2　Variation of groundwater depth along the river course

面最大水埋深由2000年的7.82 m上升到2020年的2.69 m。在距河道300 m处(图2b),英苏断面最大水埋深由2000年的8.09 m上升到2020年的4.52 m,喀尔达依断面最大水埋深由2000年的9.15 m上升到2020年的5.00 m,依干不及麻断面最大水埋深由2000年的8.25 m上升到2020年的3.29 m。在距河道500 m处(图2c),英苏断面最大水埋深由2000年的8.21 m上升到2020年的6.61 m,喀尔达依断面最大水埋深由2000年的9.45 m上升到2020年的5.46 m,依干不及麻断面最大水埋深由2000年的9.08 m上升到2020年的3.82 m。

2.2　垂直河道水埋深变化

在塔里木河下游,沿垂直于河道的不同断面表现出一些共性的特征,即随距河道距离的增加,地下水埋深总体呈减小的变化趋势,随着间歇性输水的进行,这一趋势表现得更加显著(图3)。具体而言,在输水之前,地下水埋深普遍较低,且随着距河道距离的增加,水埋深无明显变化,基本处于平稳状态。如英苏断面距离河道大于150 m处,地下水埋深基本维持在8.1 m(图3a);喀尔达依断面不同距离地下水埋深基本维持在9.20 m(图3b);而依干不及麻断面地下水埋深总体具有下降趋势,范围在7.82~9.08 m之间(图3c)。而在输水后期(2020年),英苏断面不同距离地下水埋深在4.20~6.61 m之间(图3a);喀尔达依断面不同距离地下水埋深在4.38~5.46 m之间(图3b);依干不及麻断面不同距离地下水埋深在2.69~3.82 m之间(图3c)。

2.3　地下水埋深抬升变化

研究发现,不同时期随着生态输水的间歇性进行,地下水埋深抬升幅度具有明显的差异。总体而言,在输水初期,各断面地下水埋深抬升幅度较大(图4),如英苏断面不同距离抬升2.88~4.17 m(图4a);喀尔达依断面不同距离抬升3.34~3.98 m(图4b);依干不及麻断面不同距离抬升2.3~2.42 m(图4c)。在输水中、后期,地下水埋深抬升明显低于输水初期,但不同断面略有差异。

2.4　生态输水的响应范围

在塔里木河下游距河道1050 m平行于河道的典型断面上,地下水埋深均得到显著抬升(表1),与距河道100 m、300 m、500 m平行于河道的断面地下水埋深具有相似的变化趋势,这说明生态输水影响距离可达1050 m,实施生态输水工程能够有效抬升

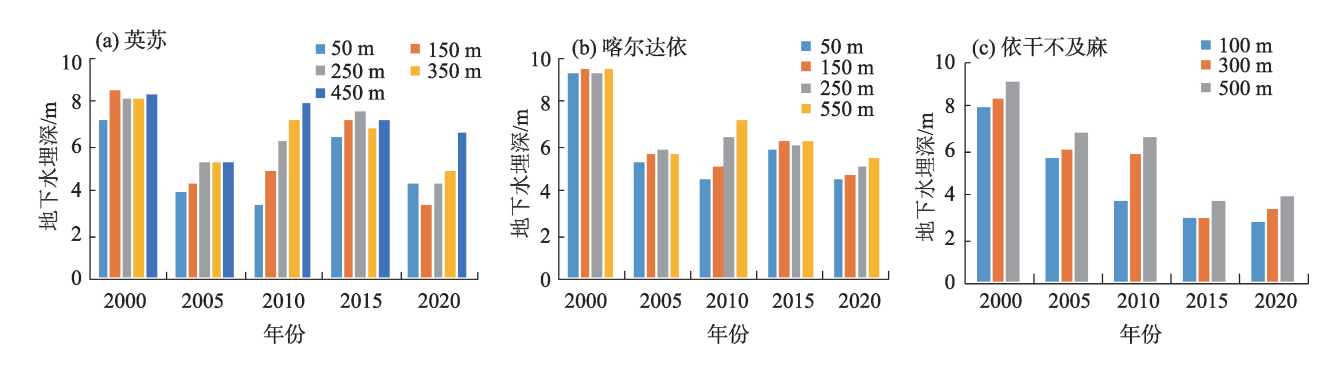


图3　垂直于河道方向地下水埋深变化

Fig. 3　Variation of groundwatar depth perpendicular to the river course

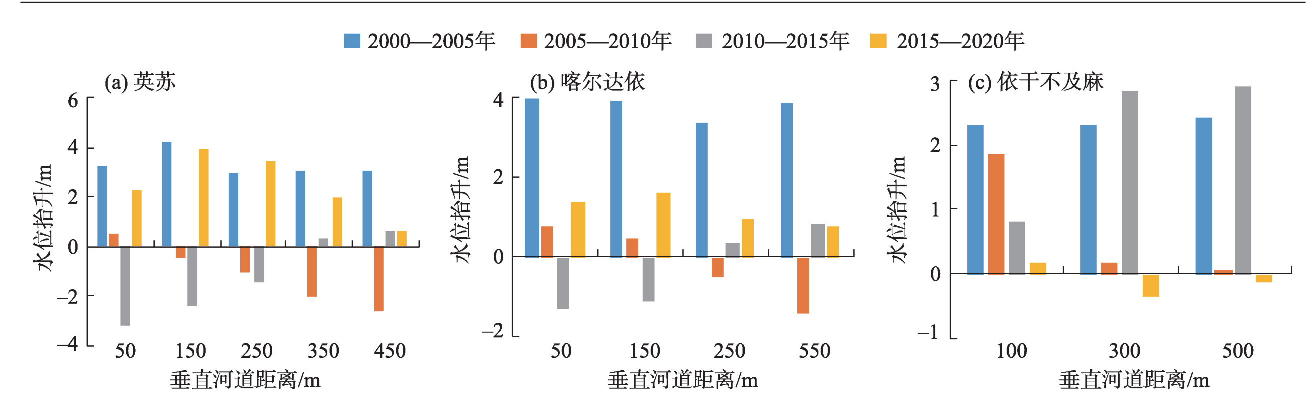


图4 垂直河道方向地下水位抬升情况

Fig. 4 Uplift of groundwater level in vertical direction

表1 输水对地下水埋深的距离影响

Tab. 1 Distance effect of water conveyance on groundwater depth

年份	地下水埋深/m		
	英苏	喀尔达依	依干不及麻
2010	7.88	7.98	7.08
2020	5.19	6.60	5.49
抬升	2.69	1.38	1.59

地下水位、增大受水的辐射范围。

2.5 输水量与地下水埋深的关系

塔里木河下游的生态输水量与地下水埋深关系(图5)表现为，当输水量很大时，地下水埋深抬升并不显著，而是出现滞后现象或缓慢增长或不增长(如2011年的第12次输水量较大，但地下水埋深峰值却出现在2012年)。这说明地下水埋深的抬升不仅与输水量有关，还与其它因素(如，输水的不同阶段、距水源头的远近、输水的频次等)有关。但输水量大能够延缓地下水位回落速度(如2017年的第18次输水)，使其在一个相对较长时间内保持在较浅的地下水位。当累积输水量达22.70×10^8 m^{3}时(2009年)，英苏、喀尔达依、依干不及麻3个断面总体地下水位排序出现拐点变化，致使依干不及麻地下水位抬升幅度明显高于英苏(0.88~4.65 m)和喀尔达依(0.53~4.07 m)。并且，70.5%监测井地下水位波动趋于稳定。

3 讨 论

塔里木河位于中纬度地区，地处我国内陆，远离海洋，气候干燥，降水稀少，加之南邻塔克拉玛干沙漠，周围高山环绕，造成水汽不足，导致地表径流稀少、下游河道断流、干涸。自然条件下地下水的补给只能靠季节性的高山带的冰川、冰雪融水、中山森林带的降水以及低山带的基岩裂隙水。因此，在人为因素的干扰下，间歇性的生态输水成为维持地下水埋深动态平衡的关键因素。近20 a来，随着间歇性输水的进行，塔里木河下游地下水埋深在纵向(沿河道走向)和横向(垂直于河道方向)上均表现出明显的抬升。这和输水次数及输水量有关，截止到2020年已累积输水21次，累积输水量达84.45×

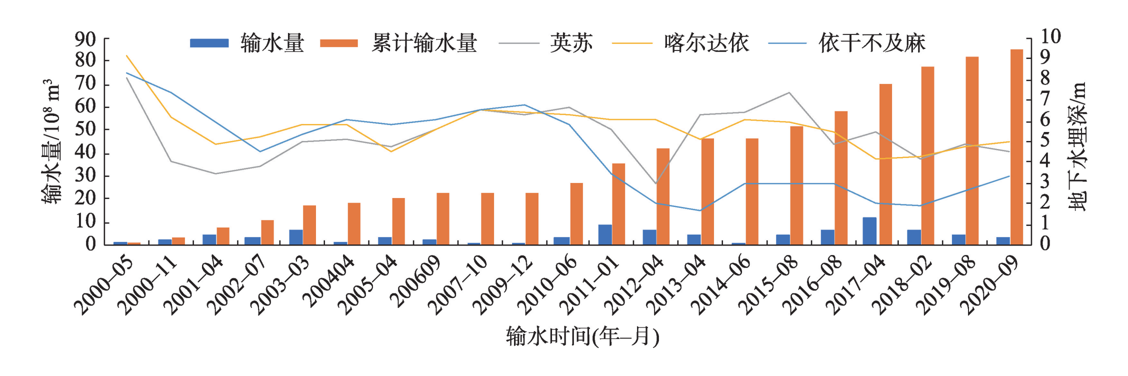


图5 输水量与地下水埋深的关系

Fig. 5 Relationship between water delivery and groundwater depth

10^8 m^3，保证了断流河道的连通，在河水长期的滋润和下渗作用下，促使地下水埋深抬升。沿河道方向不同断面水埋深抬升幅度不同，这和输水时间及距水源地的距离有关。输水初期，距离水源地（大西海子水库）较近的英苏首先受到河水滋养，受水时间较长，而较远的喀尔达依和依干不及麻由于受到距离和水量的影响，导致河水损耗较大，水量减少，出现补给滞后效应且水埋深抬升较低。随着长期输水，地下水得到有效补充，地下水埋深得到明显抬升，以至于更多的径流到达下游（台特玛湖）形成积水区而成为新的水源地，而依干不及麻距其相对较近，受其影响相对较强故其水埋深抬升相对较高。在垂直于河道方向上，输水之前地下水埋深基本处于平稳状态，随着输水的进行及距离的增加，地下水埋深抬升成降低趋势。这是因为在输水之前，河道多年处于断流状态，无地表径流影响，即使沿垂直河道距离增加，地下水埋深也基本一致，处于平稳状态。说明在输水前，水埋深变化与垂直河道距离无关。随着输水的进行，河水侧向下渗影响地下水位，越靠近河道受水影响越大，反之，距河道越远受河水影响越小。因此，输水后出现随距离增加而降低趋势。对于生态输水的响应范围，本研究发现在距河道1050 m处，监测井水埋深仍呈抬升趋势。这说明20 a来，随着输水次数的增多，累计输水量的增加，致使水源有效辐射面积增大、辐射距离增加，受其影响地下水埋深显著抬升。部分年份水埋深下降（图4），可能是处于枯水年，一方面由于气候原因导致大量蒸散耗水，另一方面可能是由于农业灌溉大量耗水，也可能是其它产业耗水或水利工程建设改变水流航道，但不同区段因地而异。

有研究指出土壤湿度与土层深度呈线性正相关关系[17]；土壤深度为0~20 cm的土层，其含水量与地下水位的相关程度最高[18]，而张钧泳等[19]研究指出绿洲区土壤含水率与地下水位相关性最高的土层是0~10 cm；不同水埋深，土壤水的下渗率不同，2~3 m为0.038 $cm\cdot min^{-1}$；1.5 m为0.051~0.077 $cm\cdot min^{-1}$[20]；黄河三角洲表层（0~10 cm）土壤含水量低于10~20 cm处，且随水埋深的增加，含水量呈显著降低之势[21]，这些研究从不同角度、不同研究区域说明土壤水与地下水位关系密切。而在塔里木河流域，土壤水随土壤深度的增加而增加，随离水源地距离增加而降低，距干流横向距离越近，各土层的含水量越高[22-23]。但不同质地的土壤导致了含水量的差异，其中沙质土多低于5%，黏土和黏质壤土多低于15%[24]。含水量的不同进而导致植被生长发生变化，前人研究[23]指出土壤含水量为16.75%~18.76%，有胡杨幼苗生长；土壤含水量为4.55%~16.75%，大龄胡杨所占比例较大；土壤含水量低于4.55%，胡杨呈老龄化趋势[23]。这说明含水量越高越有利于新生幼苗的生长，可促进植被良性发展。差异显著性和变异性分析表明，0~60 cm的土层含水量无显著差异（$P>0.05$），属于中等强度变异；大于60 cm的土层含水量差异显著（$P<0.05$），属于强变异性[22,24]。那么地下水埋深-土壤含水量-植被之间是如何作用的呢？王建宏[25]指出地下水对植被的影响主要是靠毛管压力作用使水分保持在土壤孔隙中以供植物生长发育。当地下水埋深在4 m位置时，土壤含水量可达17%，地层毛管水持水量可达70.80%，适宜植物生存；当地下水埋深在4.50~6.50 m范围时，土壤含水量在12.90%~10.70%之间，毛管水在土壤孔隙中含水量较少，易于导致植物生长发育不良；当地下水埋深在7 m以下位置时，土壤含水量仅为9.80%，地层没有毛管水，植物严重缺水，无法生长[25]。

自2000年生态输水以来，塔里木河下游地下水埋深得到了显著抬升（抬升幅度整体大于1.38 m），而使荒漠环境和退化植被得到有效恢复。其中，草地和林地面积分别增加了56%和29%[26]，植被面积净增382.85 km^2[27]，荒漠面积减少了738.95 km^2[12]，植被覆盖度增加了18%，植物种数由17种增加到46种[28-29]。水体出现频率提高约15%[28]，随着间歇性向塔里木河下游输水，台特玛湖地区生态环境持续恢复[30]，水域面积一度达到492 km^2[29]，周边形成了223 km^2的湿地[10]。塔里木河下游生态安全水平不断提高，水生态安全综合评价指数由3.91上升到8.47[11]。景观生态风险表现为低-低和高-高聚集模式，以低和较低生态风险区为主，占流域面积72.61%以上[31]。

4 结 论

本文结合近20 a的地下水监测井的实测数据，从纵向（沿河道方向）和横向（垂直河道方向）2个方面对输水后的地下水埋深变化进行了分析，得出以下主要结论：

（1）输水20 a来，沿塔里木河下游自上而下（英苏—喀尔达依—依干不及麻），在距河道100 m处，地下水埋深抬升至3.70 m、4.48 m和2.69 m；300 m处，地下水埋深抬升至4.53 m、5.00 m和3.29 m；500 m处，地下水埋深抬升至6.61 m、5.46 m和3.82 m。

（2）在垂直于河道方向，生态输水对塔里木河下游地下水位的影响范围可达1050 m，水位抬升1.38~2.69 m。

（3）生态输水前期（2000—2009年），上、中段地下水位抬升迅速，2009年以后，下游段依干不及麻地下水位抬升幅度明显高于英苏（0.88~4.65 m）和喀尔达依（0.53~4.07 m）。

参考文献（References）

[1] 陈永金, 刘加珍, 陈亚宁, 等. 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2212−2224. [Chen Yongjin, Liu Jiazhen, Chen Yaning, et al. Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2212−2224.]

[2] 徐海量, 宋郁东, 李卫红, 等. 生态输水后塔里木河下游地下水水盐动态变化[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(3): 63−67. [Xu Hailiang, Song Yudong, Li Weihong, et al. The dynamics of water and salt after ecological water transport to the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(3): 63−67.]

[3] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295−1304. [Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1295−1304.]

[4] 陈亚宁, 徐宗学. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响[J]. 中国科学(地球科学), 2004, 34(11): 1047−1053. [Chen Yaning, Xu Zongxue. Possible impacts of global climate change on water resources in Tarim River Basin, Xinjiang[J]. Scientia Sinica (Earth Sciences), 2004, 34(11): 1047−1053.]

[5] 孙天瑶, 李雪梅, 许民, 等. 2000—2018年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 415−1424. [Sun Tianyao, Li Xuemei, Xu Min, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage in the Tarim River Basin from 2000 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 415−1424.]

[6] Engels J G, Jensen K. Patterns of wetland plant diversity along estuarine stress gradients of the Elbe (Germany) and Connecticut (USA) Rivers[J]. Plant Ecology & Diversity, 2009, 2(3): 301−311.

[7] Wang Y G, Deng C Y, Liu Y, et al. Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 177−185.

[8] 崔旺诚, 李卫红, 徐海量. 塔里木河下游输水与生态保育[J]. 干旱区地理, 2004, 27(2): 172−178. [Cui Wangcheng, Li Weihong, Xu Hailiang. Research on the response scope of natural vegetation in the lower reaches of Tarim River after water transport[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(2): 172−178.]

[9] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近20 a塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238−247. [Li Lijun, Zhang Xiaoqing, Chen Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238−247.]

[10] 蔚亮, 李均力, 包安明, 等. 塔里木河下游湿地面积时序变化及对生态输水的响应[J]. 植物生态学报, 2020, 44(6): 616−627. [Yu Liang, Li Junli, Bao Anming, et al. Temporal areal changes of wetlands in the lower reaches of the Tarim River and their responses to ecological water conveyance[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(6): 616−627.]

[11] 李梦怡, 邓铭江, 凌红波, 等. 塔里木河下游水生态安全评价及驱动要素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 39−47. [Li Mengyi, Deng Mingjiang, Ling Hongbo, et al. Evaluation of ecological water security and analysis of driving factor in the lower Tarim River [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 39−47.]

[12] 王珊珊, 王金林, 周可法, 等. 塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 69−74, 80. [Wang Shanshan, Wang Jinlin, Zhou Kefa, et al. Response of land use/land cover change to ecological water transmission in the lower reach of Tarim River[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 69−74, 80.]

[13] 夏力哈尔·俄坦. 塔里木河干流地下水变化动态研究[J]. 水利科技与经济, 2020, 26(9): 10−15. [Harlechhal Ertan. Study on the dynamic change of groundwater in the main stream of Tarim River[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2020, 26(9): 10−15.]

[14] 刘迁迁, 古力米热·哈那提, 王光焰, 等. 间歇性生态输水塔里木河下游断面地下水位变化模拟[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5519−5528. [Liu Qianqian, Gulimire Hanati, Wang Guangyan, et al. Simulation of sectional groundwater level variation in the lower reaches of Tarim River under intermittent ecological water conveyance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5519−5528.]

[15] 刘迁迁, 古力米热·哈那提, 苏里坦, 等. 塔里木河下游河岸带地下水埋深对生态输水的响应过程[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 979− 986. [Liu Qianqian, Gulimire Hanati, Sulitan, et al. Response process of groundwater table to ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River riparian zone[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 979−986.]

[16] 努热曼古丽·图尔荪, 玉米提·哈力克, 塔吉古丽·艾麦提. 生态输水对塔里木河下游地下水变化的影响分析[J]. 宁夏农林科技, 2014, 55(7): 58−60. [Nuremanguli Tuersun, Umut Halik, Ta-

jiguli Aimaiti. An analysis on effects of ecological water transportation on groundwater changes of lower reaches of Tarim River[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2014, 55(7): 58-60.]

[17] 马剑, 刘贤德, 李广, 等. 祁连山北麓中段青海云杉林土壤水热时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1033-1040. [Ma Jian, Liu Xiande, Li Guang, et al. Spatial and temporal variations of soil moisture and temperature of *Picea crassifolia* forest in north piedmont of central Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1033-1040.]

[18] 刘睿明, 孔东升, 王立, 等. 黑河湿地自然保护区沼泽湿地地下水埋深和土壤水分时空分布规律[J]. 草业科学, 2019, 36(9): 2223-2232. [Liu Ruiming, Kong Dongsheng, Wang Li, et al. Spatial and temporal distribution of groundwater depth and soil moisture in marsh wetland across the Heihe Wetland Nature Reserve [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(9): 2223-2232.]

[19] 张钧泳, 丁建丽, 谭娇. 基于SVM的绿洲荒漠交错带土壤水分与地下水埋深反演[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 221-230. [Zhang Junyong, Ding Jianli, Tan Jiao. Inversion of soil moisture and shallow groundwater depth based on SVM in arid oasis-desert ecotone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 221-230.]

[20] 武敏, 冯绍元. 不同地下水埋深土壤水分入渗规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(增刊): 79-81. [Wu Min, Feng Shaoyuan. Study on soil water infiltration law under different water tables[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(Suppl. 1): 79-81.]

[21] 李小倩, 夏江宝, 赵西梅, 等. 不同潜水埋深下浅层土壤的水盐分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(2): 43-50. [Li Xiaoqian, Xiao Jiangbao, Zhao Ximei, et al. Water and salt distribution characteristics of shallow soil at different diving water levels[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(2): 43-50.]

[22] 马晓东, 李卫红, 朱成刚, 等. 塔里木河下游土壤水分与植被时空变化特征[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4035-4045. [Ma Xiaodong, Li Weihong, Zhu Chenggang, et al. Spatio-temporal variation in soil moisture and vegetation along the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4035-4045.]

[23] 杜伟宏, 管文轲, 霍艾迪, 等. 塔里木河干流胡杨林下土壤的水盐特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(5): 92-99. [Du Weihong, Guan Wenke, Huo Aidi, et al. Water and salt characteristics of soil under *Populus euphratica* forest in the main stream of Tarim River[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2019, 39(5): 92-99.]

[24] 朱成刚, 李卫红, 马建新, 等. 塔里木河下游地下水位对柽柳叶绿素荧光特性的影响[J].应用生态学报, 2010, 21(7): 1689-1696. [Zhu Chenggang, Li Weihong, Ma Jianxin, et al. Effects of groundwater level on chlorophyll fluorescence characteristics of *Tamarix hispida* in lower reaches of Tarim River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1689-1696.]

[25] 王建宏. 塔里木河流域干旱区地下水生态调节与监测预警分析[J]. 河南水利与南水北调, 2020, 49(2): 13-15, 26. [Wang Jianhong. Analysis on ecological regulation, monitoring and early warning on groundwater in arid area of Tarim River Basin[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2020, 49(2): 13-15, 26.]

[26] 唐建, 王光焰, 徐生武. 塔里木河干流生态廊道时空变化及保护对策[J]. 水利规划与设计, 2020(8): 49-53. [Tang Jian, Wang Guangyan, Xu Shengwu. Spatio-temporal change and protection plan of ecological corridor along mainstream of Tarim River[J]. Water Resources Planning and Design, 2020(8): 49-53.]

[27] 李均力, 肖昊, 沈占锋, 等. 2013—2018年塔里木河下游植被动态变化及其对生态输水的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 985-992. [Li Junli, Xiao Hao, Shen Zhanfeng, et al. Vegetation changes during the 2013—2018 period and its response to ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 985-992.]

[28] 任强, 龙爱华, 杨永民, 等. 近20年塔里木河干流生态环境变化遥感监测分析[J]. 水利水电技术, 2021, 52(3): 103-111. [Ren Qiang, Long Aihua, Yang Yongmin, et al. Analysis on remote sensing monitoring of eco-environment variation of main stream basin of Tarim River in recent 20 years[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(3): 103-111.]

[29] 阿迪力江·买买提. 浅析塔里木河流域综合治理及生态输水成效[J]. 水电与新能源, 2020, 34(7): 57-59, 63. [Adeline Maimaiti. Comprehensive management and ecological water supply in Tarim River Basin[J]. Hydropower and New Energy, 2020, 34(7): 57-59, 63.]

[30] 霍天赐, 颜伟, 马晓飞. 内陆河尾闾湖泊水域面积变化及驱动因素研究——以台特玛湖地区为例[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 149-156. [Huo Tianci, Yan Wei, Ma Xiaofei. A study of the variation and driving factors of the water area of the terminal lake of inland river: A case study of Taitema Lake region[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(3): 149-156.]

[31] 沈海岑, 薛联青. 基于土地利用变化的塔里木河下游区近20 a景观生态风险研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(11): 77-82. [Shen Haicen, Xue Lianqing. Landscape ecological risk assessment of the lower reaches of Tarim River based on land use change in recent 20 years[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(11): 77-82.]

Effects of ecological water conveyance on groundwater depth in the lower reaches of Tarim River

CHEN Yongjin[1], Aikeremu Abula[2], ZHANG Tianju[3,4], CHEN Yapeng[3], ZHU Chenggang[3],
CHENG Yong[2], LIU Lu[3,4], LI Xiaoyang[3,4], ZHANG Qifei[3,4]
(1. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong, China;
2. Xinjiang Tarim River Basin Authority, Korla 841000, Xinjiang, China;
3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Groundwater is a key factor for maintaining the survival and growth of desert riparian vegetation, which is essential for the restoration of degraded vegetation. In this study, based on the measured data of groundwater depth in the process of ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River in Xinjiang, China, the temporal and spatial changes of groundwater as well as its response to ecological water conveyance from 2000 to 2020 are analyzed. The monitoring results showed that groundwater depth on both sides of the lower reaches of Tarim River rose significantly under the condition of ecological water conveyance. (1) In the longitudinal direction, from Yingsu in the upstream section and Kaldayi in the middle section to Yiganyuma in the downstream section, at 100 m away from the river, the groundwater depth rises from 7.76 m, 9.31 m, 7.82 m to 3.70 m, 4.48 m and 2.69 m after water conveyance, respectively; at 300 m away from the river, the groundwater depth rises from 8.09 m, 9.15 m, 8.25 m to 4.53 m, 5.00 m and 3.29 m after water conveyance, respectively; at 500 m away from the river, the groundwater depth rises from 8.21 m, 9.45 m, 9.08 m to 6.61 m, 5.46 m and 3.82 m after water conveyance, respectively. (2) In the vertical direction of the river, according to the monitoring data of underground wells, the influence range of ecological water conveyance on the groundwater depth of the upper, middle, and lower reaches of Tarim River reached 1050 m and water level rising of 2.69 m, 1.38 m and 1.59 m, respectively. (3) In the early stage of ecological water conveyance (2000—2009), the groundwater depth in the upper and middle reaches of the river rose rapidly. After 2009, the groundwater depth in the lower reaches of the river was significantly higher than that in Yingsu (0.88−4.65 m) and Kaldayi (0.53−4.07 m). Moreover, the groundwater depth fluctuation of 70.5% monitoring wells tended to be stable. It shows that intermittent ecological water conveyance is helpful in raising the groundwater depth, which is the main source of groundwater recharge and has a certain role in maintaining the dynamic balance of higher groundwater levels.

Key words: ecological water conveyance; groundwater depth; section; Tarim River